

RESISTÊNCIA AO FOGO DE COLUNAS EM AÇO INOXIDÁVEL COM SECÇÕES CIRCULARES OCAS



Flávio Arrais
Investigador
RISCO/UA - Aveiro



Nuno Lopes
Professor
Auxiliar
RISCO/UA - Aveiro



Paulo Vila Real
Professor
Catedrático
RISCO/UA - Aveiro

Palavras-chave: resistência ao fogo; aço inoxidável; secções circulares ocas; colunas; análise numérica.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação do aço inoxidável na construção como material estrutural tem aumentado, devido a diferentes vantagens, como a sua resistência à corrosão e aparência estética [1,2]. Apesar do custo inicial elevado, o aço inoxidável pode ser um material competitivo se for considerado o custo do ciclo de vida e a menor necessidade de manutenção. Adicionalmente possui maior resistência ao fogo quando comparado com o aço carbono, potenciando a possível ausência de proteção.

Os aços inoxidáveis austeníticos são geralmente os grupos mais utilizados para aplicações estruturais, mas recentemente tem-se demonstrado algum interesse em aços ferríticos e austeníticos-ferríticos (Duplex) para fins estruturais devido a vantagens específicas. O ferrítico apresenta a vantagem de ter menos percentagem de níquel na sua composição química, diminuindo desta forma o seu custo inicial, mas mantendo a sua resistência quer à corrosão quer estrutural. O Duplex apresenta uma boa resistência de suporte de cargas mas também uma elevada resistência à corrosão e ao desgaste.

Este trabalho apresenta um estudo numérico sobre a resistência de colunas sujeitas a compressão axial, com secção transversal circular oca, em aço inoxidável a temperaturas elevadas. A escolha pela utilização destes perfis tem sido feita devido a diversas vantagens, como a natureza estética ou o melhor desempenho relativamente a esforços de torção, quando comparados com os perfis habituais em I e H.

A determinação dos esforços axiais resistentes últimos foi realizada através da aplicação de modelos em elementos finitos. E os respetivos resultados numéricos obtidos foram comparados com as prescrições do Eurocódigo 3 (EC3) [3,4], tendo-se concluído que esta metodologia se encontra desajustada e por vezes fora da segurança para o tipo de perfis aqui analisados. O EC3 preconiza que os elementos estruturais em aço inoxidável devem ser verificados usando as mesmas fórmulas de cálculo desenvolvidas para o aço carbono, o que se tem revelado ser impreciso e por vezes inseguro [5].

Visto que de acordo com o EC3 [4], diferentes classes de aço inoxidável apresentam diferentes leis constitutivas a temperaturas elevadas, neste estudo paramétrico são consideradas as seguintes classes: i) 1.4301 (austenítico); ii) 1.4003 (ferrítico); iii) 1.4462 (duplex).

Este estudo tem como principal objetivo analisar a precisão das formulações de cálculo do EC3 para colunas com secções circulares ocas em aço inoxidável sujeitas a altas temperaturas, submetidas a compressão axial, por meio de análises geométrica e materialmente não-lineares com imperfeições, utilizando o programa de elementos finitos SAFIR [6].

2. MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO AO FOGO

No presente ponto são apresentadas as metodologias de cálculo simplificadas, analisadas neste trabalho, para o cálculo da resistência à compressão de colunas em aço inoxidável em situação de incêndio. O cálculo da resistência da secção, assim como a resistência do elemento, é apresentado segundo as regras do Eurocódigo e segundo outra proposta de cálculo com as devidas adaptações ao caso de estudo em questão.

2.1 Eurocódigo 3

Segundo a Parte 1-2 do EC3 [3], a resistência da secção de um elemento em aço inoxidável ao fogo é calculada através do mesmo procedimento que para o aço carbono, alterando apenas as propriedades mecânicas do material para consideração das temperaturas elevadas na secção. Relativamente à classificação da secção transversal, a Eq. (1) foi usada para calcular o parâmetro ε_θ , necessário para a determinação dos limites de classificação do EC3 [7].

$$\varepsilon_\theta = 0.85 \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0.5} \quad (1)$$

O valor de resistência de secções de elementos axialmente comprimidos de secções de Classe 1, 2 ou 3 com uma temperatura uniforme deve ser determinado a partir da Eq. (2).

$$N_{fi,t,Rd} = A f_{y,\theta} / \gamma_{M,\bar{n}} \quad (2)$$

Para secções da Classe 4, de acordo com o anexo E da Parte 1-2 do EC3, a área efetiva (A_{eff}) deve ser considerada em vez da área bruta da secção transversal.

Em situação de incêndio, são aceitáveis maiores deformações quando comparadas com as deformações obtidas à temperatura normal. Desta forma, em vez da tensão limite convencional

de proporcionalidade a 0,2% normalmente utilizada à temperatura normal, para secções das Classes 1, 2 e 3 a temperaturas elevadas, a tensão correspondente a uma extensão total de 2% deve ser adotada como tensão de cedência [3], como se apresenta na Eq. (3).

$$f_{y,\theta} = f_{2\%,\theta} = k_{2\%,\theta} f_y \quad (3)$$

Contudo, para secções transversais da Classe 4, de acordo com o Anexo E da Parte 1-2 do EC3, deve ser utilizada como tensão de cedência a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, Eq. (4).

$$f_{y,\theta} = f_{0.2p,\theta} = k_{0.2p,\theta} f_y \quad (4)$$

Os fatores de redução da tensão de cedência apresentados encontram-se no Anexo C da Parte 1-2 do EC3 para o aço inoxidável a temperaturas elevadas, para os diferentes tipos de aço inoxidável analisados.

O valor de resistência à encurvatura de elementos axialmente comprimidos de secções de Classe 1, 2 ou 3 com uma temperatura uniforme deve ser determinado a partir da Eq. (5).

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A f_{y,\theta} / \gamma_{M,fi} \quad (5)$$

Para secções da Classe 4, de acordo com o anexo E da Parte 1-2 do EC3, a área efetiva (A_{eff}) deve ser considerada em vez da área bruta da secção transversal.

O valor de χ_{fi} , coeficiente de redução para a encurvatura em situação de incêndio, pode ser obtido de acordo com a seguinte Eq. (6):

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{i,\theta} + \sqrt{[\phi_{i,\theta}]^2 - [\bar{\lambda}_{i,\theta}]^2}} \leq 1,0 \quad (6)$$

com

$$\phi_{i,\theta} = \frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_{i,\theta} + (\bar{\lambda}_{i,\theta})^2] \quad (7)$$

em que α é um fator de imperfeição, proposto por Vila Real e Franssen [7], e posteriormente adoptado pela Parte 1-2 do EC3 [3] é dado por:

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (8)$$

No caso da temperatura ser uniforme ao longo de toda a secção transversal, o valor da esbelteza adimensional normalizada $\bar{\lambda}_\theta$ é dado pela Eq. (9):

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (9)$$

onde $k_{y,\theta} = k_{0.2p,\theta}$ no caso de ser uma secção de Classe 4, e $k_{E,\theta}$ é o fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a atingida no instante t, e a esbelteza normalizada à temperatura normal, $\bar{\lambda}$, Eq (10):

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \quad (10)$$

Como referido anteriormente para secções da Classe 4, a área efetiva (A_{eff}) deve ser considerada em vez da área bruta da secção transversal. O valor da carga crítica de Euler, N_{cr} , é dado pela Eq. (11), onde L é o comprimento do elemento:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (11)$$

2.2 Proposta para o cálculo da resistência à compressão axial de perfis I Classe 1 e 2

Segundo um estudo realizado em colunas de secção I de Classe 1 e 2, Lopes e Vila Real [5] da Universidade de Aveiro desenvolveram uma nova proposta para o cálculo da resistência à compressão mantendo a formulação principal proposta pelo EC3 e modificando os seguintes parâmetros:

$$\chi_{i,fi} = \frac{1}{\phi_{i,\theta} + \sqrt{[\phi_{i,\theta}]^2 - \beta[\bar{\lambda}_{i,\theta}]^2}} \leq 1,0 \quad (12)$$

com

$$\phi_{i,\theta} = \frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_{i,\theta} + \beta (\bar{\lambda}_{i,\theta})^2] \quad (13)$$

em que o α considerado, proposto por Lopes e Vila Real [5], é uma simplificação que garante a segurança e um nível de precisão aceitável no dimensionamento destes elementos onde a única alteração em relação à expressão do EC3 é o parâmetro que para os aços inoxidáveis passa a ser dado por:

$$\alpha = 1,5 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (14)$$

O parâmetro β é igual a 1.0 para os casos da encurvadura segundo o eixo forte e 1.5 para os casos da encurvadura segundo o eixo fraco. Sendo uma secção duplamente simétrica, o valor adotado de β foi de 1.0.

Apesar de o estudo ter sido realizado para outras secções diferentes das circulares tubulares e ao mesmo tempo não abranger todas as classes da secção, o EC3 não especifica regras de cálculo para o tipo de secção em estudo pelo que o raciocínio a efetuar é o mesmo independentemente da secção em causa.

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA

Neste ponto são apresentados os diferentes casos de estudo analisados neste trabalho. São apresentados os detalhes da elaboração do modelo numérico aplicado e as diferentes propriedades materiais consideradas para o estudo paramétrico.

3.1 Casos de estudo

No estudo apresentado foram analisadas duas secções circulares ocas com o mesmo diâmetro mas diferentes espessuras (ambas de Classe 4). As secções circulares designadas por CHS_244.5x1.0 e CHS_244.5x1.5, apresentam diâmetro comercial de 244,5 mm e espessuras de 1,0 e 1,5 mm, respetivamente, sendo uma mais esbelta que a outra. Os comprimentos variam entre 1 m e 24 m de forma a abranger um intervalo de diferentes esbeltezas ajustado. Consideraram-se colunas em aço inoxidável da classe 1.4301 (austenítico), 1.4003 (ferrítico) e 1.4462 (duplex) submetidas às temperaturas uniformes de 350°C, 500°C, 600°C e 700°C. A escolha da temperatura de 350°C está relacionada com a temperatura crítica recomendada para perfis com secções de Classe 4 quando não é realizado nenhum cálculo e as restantes de acordo com as temperaturas críticas representativas neste tipo de elementos estruturais.

3.2 Modelo numérico

Para determinar a carga última foi utilizado o programa de elementos finitos SAFIR. Utilizaram-se elementos de casca, com quatro nós e seis graus de liberdade por nó (três translações e três rotações). As condições de apoio de simplesmente apoiado foram aplicadas em ambas as extremidades, impedido o deslocamento na vertical (eixo dos zz) e para fora do plano (eixo dos yy), e a meio vão, impedido o deslocamento segundo o eixo do xx de forma a garantir a simetria do elemento e dos esforços. As cargas foram aplicadas verticalmente, paralelas ao elemento, nas extremidades do modelo distribuídas pela superfície da secção, algumas nos mesmos pontos de restrição. As cargas apenas foram aplicadas no modelo após atingida a temperatura requerida. A Figura 1 apresenta um modelo de elementos de casca com 3 m de comprimento representando as condições de apoio e as superfícies aplicadas para aplicação das restrições e responsáveis pelo fecho da secção tubular nas extremidades. As placas de extremidade estão à temperatura normal e possuem 10x a espessura da secção do elemento.

Em relação às imperfeições geométricas, estas foram introduzidas no modelo numérico com a forma dos modos de encurvadura obtidos com o programa CAST3M [8] (aplicando a interface RUBY [9]) conforme visível na Figura 2. Para a amplitude das imperfeições locais considerou-se 80% de $d/100$ e para as imperfeições globais 80% de $L/750$, de acordo com o Anexo C da Parte 1-5 do EC3 [10] e as tolerâncias geométricas de fabrico descritas em D.1 do Anexo D da norma EN 1090-2+A1 [11] e EN10219-2 [12], onde d representa o diâmetro da secção e L o comprimento do elemento em causa. Seguindo as recomendações da Parte 1-5 do EC3 [10], foi introduzida a combinação das imperfeições geométricas anteriormente enunciadas. Segundo a norma, tendo como base os diferentes modos de encurvadura, é necessário escolher uma imperfeição de base (a que confere menor valor de resistência ao elemento) à qual se adicionam as restantes com os seus valores reduzidos para 70% do seu valor total.

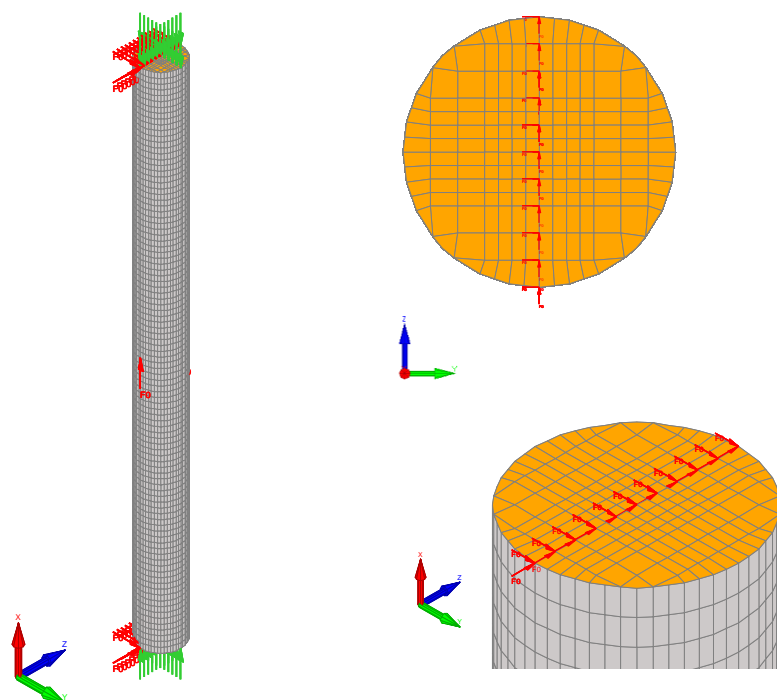


Figura 1: Modelo numérico com as restrições aplicadas em colunas com secção circular ocas.

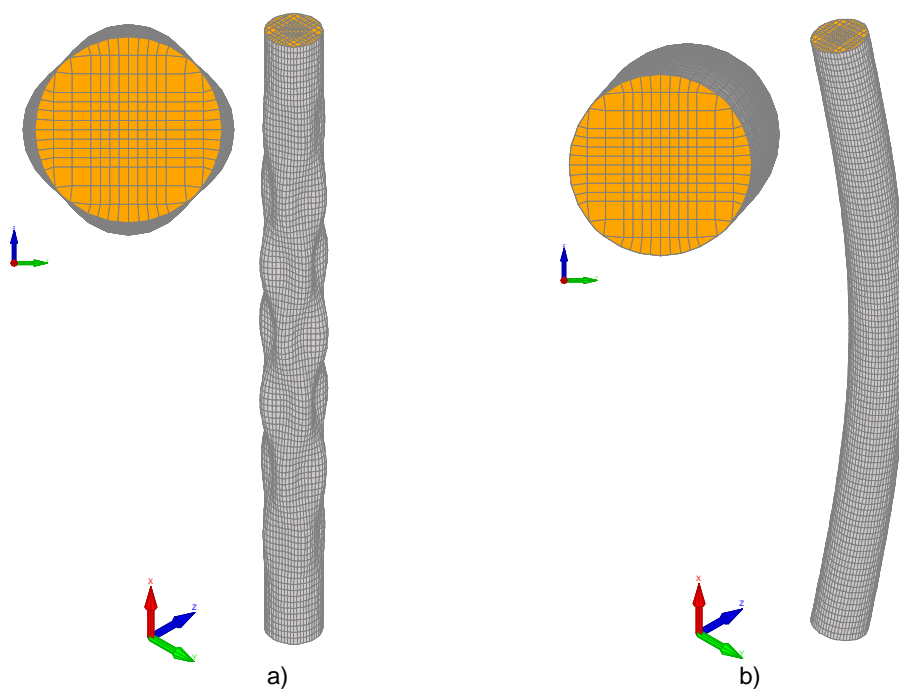


Figura 2: Imperfeições geométricas a) locais e b) globais ampliadas dos elementos.

Na Tabela 1 encontram-se os valores nominais da tensão de cedência (f_y), da tensão última (f_u) e do módulo de elasticidade (E) aplicados nos modelos de diferentes tipos de aço inoxidável.

Tabela 1. Valores nominais para os diferentes tipos de aço inoxidável [4].

Tipo	Classe	Tensão de cedência f_y (MPa)	Tensão última f_u (MPa)	Módulo de Elasticidade E (GPa)
Austenítico	1.4301	230	520	200
Ferítico	1.4003	280	450	220
Duplex	1.4462	480	660	200

Estas propriedades mecânicas são reduzidas a temperaturas elevadas conforme apresentado na Figura 3, variando para cada classe de aço.

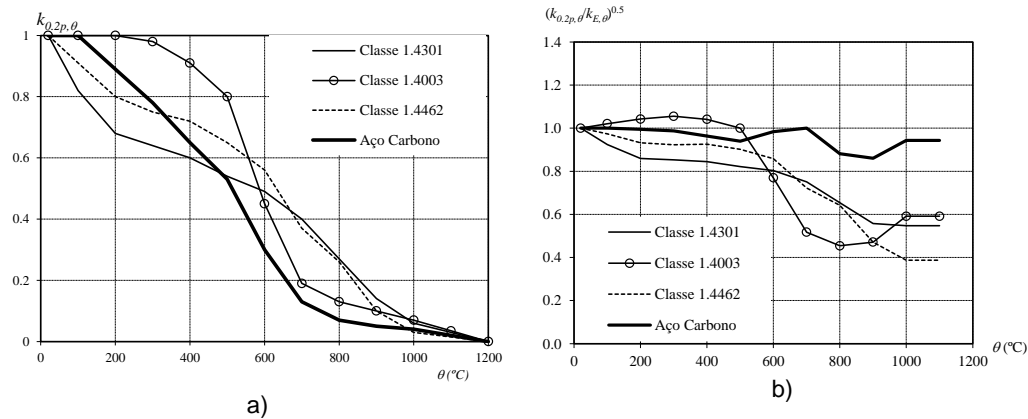


Figura 3: a) Redução da tensão de cedência e b) variação do fator $(k_{0,2p,\theta}/k_{E,\theta})^{0.5}$ para cada classe de aço a temperaturas elevadas [3].

Estes valores apresentados na Figura 3 b) refletem as grandes diferenças do aço carbono e do aço inoxidável principalmente a partir dos 600°C, que terão uma grande influência na análise dos resultados obtidos numericamente quando comparados com o EC3.

4. ESTUDO PARAMÉTRICO

Na presente secção apresenta-se a comparação entre a metodologia de cálculo preconizada pelo EC3, a proposta para o cálculo da resistência à compressão axial de perfis I Classe 1 e 2 (denominada por “Proposta UA”) e os resultados obtidos após a análise numérica com o recurso ao programa SAFIR. Nesta comparação foram criados gráficos de encurvadura em função da esbelteza dos elementos. Os resultados foram agrupados por cada secção e por classe de aço referido no ponto 3.1 do presente trabalho. O valor de χ_{fi} é obtido entre o quociente entre a carga última do elemento e o esforço axial máximo resistente da secção para a temperatura considerada, ambos obtidos pelo SAFIR (Figura 4-6). Quanto às diferentes curvas, o mesmo raciocínio foi aplicado tendo em conta cada metodologia de cálculo.

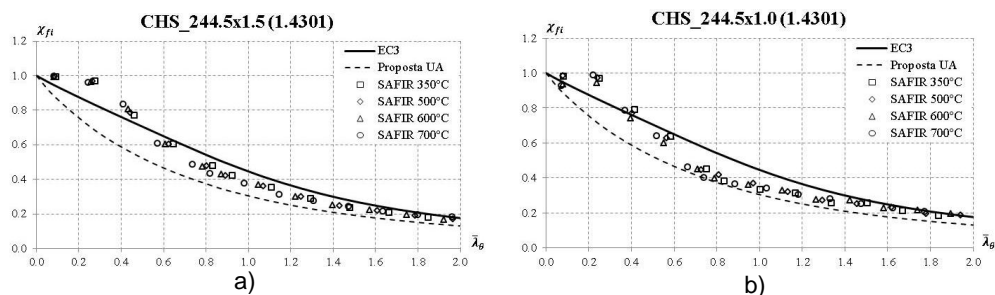


Figura 4: Resultados numéricos de colunas em aço inoxidável com secções circulares ocas para o aço inoxidável austenítico 1.4301 vs. EC3 a elevadas temperaturas.

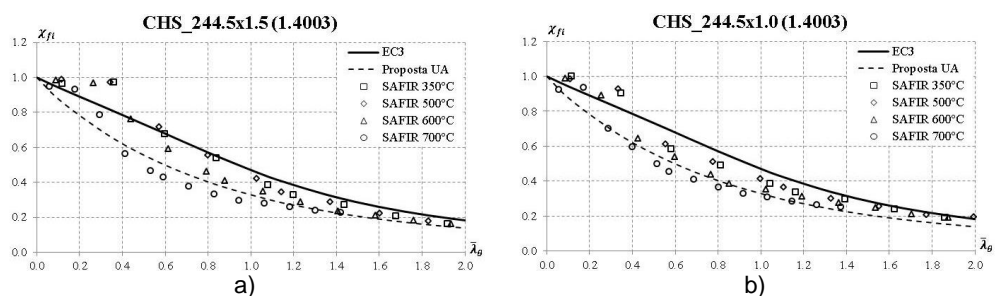


Figura 5: Resultados numéricos de colunas em aço inoxidável com secções circulares ocas para o aço inoxidável ferrítico 1.4003 vs. EC3 a elevadas temperaturas.

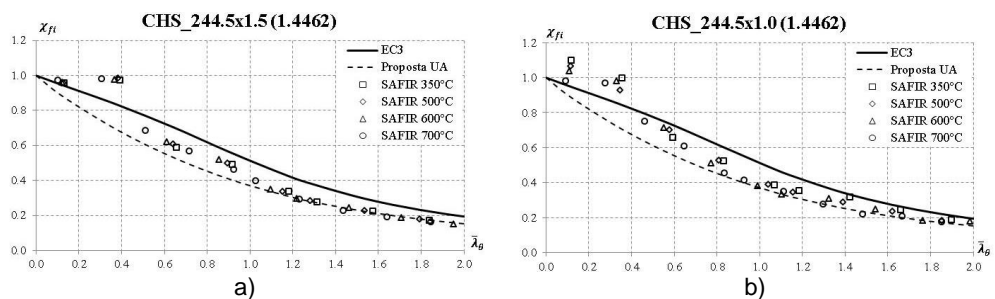


Figura 6: Resultados numéricos de colunas em aço inoxidável com secções circulares ocas para o aço inoxidável austenítico-ferrítico 1.4462 vs. EC3 a elevadas temperaturas.

Na Figura 7 apresentam-se dois exemplos de modos de colapso de colunas de 3 m e 7m de comprimento após concluída a análise numérica.

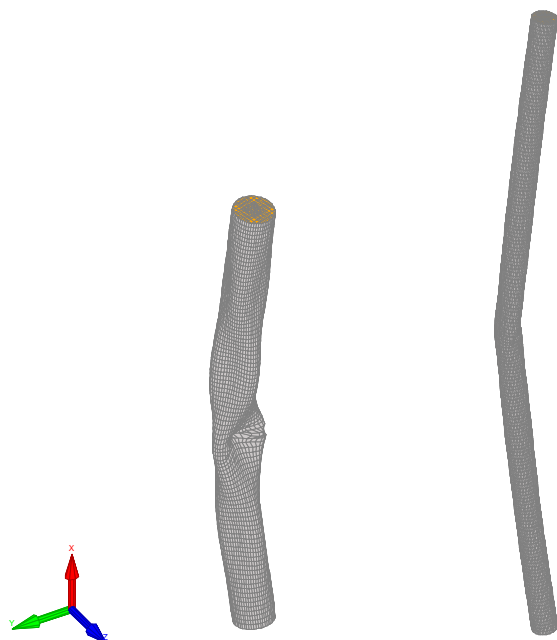


Figura 7: Exemplo da deformação após colapso de um elemento com 3 e 7 m.

Observando os resultados dos gráficos pode-se constatar que, para esbeltezas médias a elevadas, uma grande parte dos resultados se encontra fora da segurança, abaixo da curva de encurvadura do EC3. Comparativamente à curva “Proposta UA” os valores parecem estar melhor ajustados e mais abrangidos no lado da segurança. No entanto, para o aço inoxidável ferrítico 1.4003, os valores obtidos para os 700°C distanciam-se do domínio da segurança ficando abaixo desta curva. Esta diferença obtida para os 600°C e 700°C, comparativamente às restantes temperaturas, deve-se à descida abrupta do fator $(k_{0,2p,\theta}/k_{E,\theta})^{0.5}$ para as temperaturas acima de 600°C, conforme visualizado na Figura 3. Regra geral também se verifica que para as secções mais esbeltas (de espessura 1.0 mm), os valores tendem a estar cada vez mais baixos, ou seja, mais inseguros.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo numérico sobre o comportamento ao fogo de colunas com secções circulares ocas em diferentes classes de aço inoxidável (austenítico, ferrítico e duplex).

Com o objetivo de melhor compreender o comportamento ao fogo destes elementos em aço inoxidável e as diferenças entre as diferentes classes de aço, foram analisados dois perfis de Classe 4, com diferentes esbeltezas, para várias temperaturas elevadas.

Este estudo permitiu concluir que o EC3 não fornece metodologias adequadas e seguras quando comparadas com a capacidade de carga última obtida numericamente. No seguimento, uma proposta desenvolvida pela Universidade de Aveiro para colunas de secção I de Classe 1

e 2 também foi analisada. Observou-se que a aplicação desta proposta permitiu superar a insegurança observada anteriormente para a grande maioria dos casos analisados, mas de forma demasiado conservativa. Os casos que continuaram fora da segurança correspondem às colunas em aço inoxidável ferrítico 1.4003 quando sujeitas a temperaturas de 700°C.

Resumindo, a resistência de elementos estruturais em aço inoxidável para o caso de incêndio ainda não está completamente clarificada, motivando desta forma e justificando o desenvolvimento de mais estudos com o objetivo de alcançar formulações mais precisas e seguras para esses elementos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto “StaSteFi - Dimensionamento ao fogo de elementos estruturais em aço inoxidável”, POCI-01-0145-FEDER-030655, suportado pelo orçamento do POCI Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) na sua componente FEDER e pelo orçamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.

REFERÊNCIAS

- [1] Gardner, L. - *The use of stainless steel in structures*, Progress in Structural Engineering and Materials, vol 7, 2005, pp 45-55.
- [2] Euro Inox, SCI, Steel Construction Institute - *Design Manual for Structural Stainless Steel*, 3rd edition, 2006.
- [3] CEN - EN 1993-1-2, *Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1–2: General rules – Structural fire design*, Belgium, 2005.
- [4] CEN - EN 1993-1-4, *Eurocode 3: Design of steel Structures – Part 1–4: General rules – Supplementary Rules for Stainless Steels*, Belgium, 2006.
- [5] Lopes, N.; Vila Real, P.; Simões da Silva, L.; Franssen, J.-M. - *Axially loaded stainless steel columns in case of fire*, Journal of Structural Fire Engineering, vol 1, 2010, pp 43-59.
- [6] Franssen, J.-M.; Gernay, T. - *Modelling structures in fire with SAFIR®: theoretical background and capabilities*, Journal of Structural Fire Engineering, 2017.
- [7] Franssen, J.-M.; Vila Real, P. - *Fire Design of Steel Structures*, ECCS; Ernst & Sohn, a Wiley Company, 2nd edition, 2015.
- [8] CEA - *CAST 3M research FEM environment*. development sponsored by the French Atomic Energy Commission <http://www-cast3m.cea.fr/>, 2012.
- [9] Couto, C.; Vila Real, P.; Lopes, N. - *RUBY an interface software for running a buckling analysis of SAFIR models using Cast3M*, University of Aveiro, 2013.
- [10] CEN - EN 1993-1-5, *Eurocode 3, Design of steel Structures – Part 1–5: Plated structural elements*, Belgium, 2006.
- [11] CEN - EN 1090-2, *Technical requirements for the execution of steel structures*, Belgium, 2011.
- [12] CEN - EN 10219-2, *Cold Formed Welded Structural Hollow Sections of Non-alloy and Fine Grain Steels - Part 2: Tolerances, Dimensions and Sectional Properties*, Belgium, 2006.